

冷却しつつある高温花崗岩

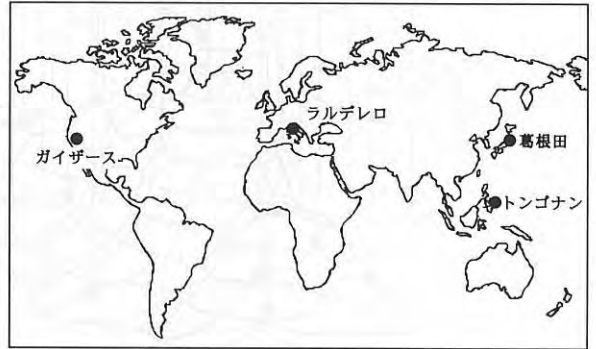
-500℃葛根田花崗岩など地熱地帯の花崗岩の特徴について-

笹田 政克¹⁾・佐々木宗建²⁾

1. はじめに

私たちが通常目にする花崗岩は、隆起・侵食が進んだ地域で地表に顔を出した、マグマの余熱が残っていない古い時代のものであり、この四半世紀地熱資源の調査が進むにつれ、地熱地帯の地下深くにまだ高温を保持している花崗岩がいくつか見つかってきている。そのような高温花崗岩について2003年9月に豊橋市の愛知大学で開催されたハットン シンポジウムで、Granitoids at Cooling Stages from Sub-solidus to Hydrothermal Temperatures: Evidence from Active Geothermal Systemsという演題で講演した(Sasada and Sasaki, 2003)。小文はこの講演に内容を多少加筆したものである。

ハットンは1785年に英国Glen Tiltにおいて、大きな花崗岩体から派生した赤色花崗岩の脈が黒色雲母片岩を横切る露頭の観察から、花崗岩が溶融物から形成されたことに確信を得たといわれている(Lyell, 1830)。まだ、花崗岩の成因として、水成説と火成説が争っていた時代のことである。それから200年が経ち、今では花崗岩がマグマから固まったものであることを疑う者はいないが、実験室の高温高压装置は別として、花崗岩が固まる現場を見た者はいない。花崗岩ができる場所は地下とても深く、そこは700℃とか800℃の高温である。人がおいそれと近づけるような場所ではない。ところが、近年の地熱資源調査では、岩手県の葛根田地熱地帯で地下4,000m近くまで掘削が行われ、とうとう500℃を越えるところまでボーリングの先端が届いた(Sasada et al., 1998)。そこにどんな花崗岩があったのかをこの小文で述べるが、一足飛びに



第1図 高温の花崗岩が地下で発見された地熱地帯。

500℃の世界に入る前に、海外の地熱地域、米国のガイザース、フィリピンのトンゴナン、イタリアのラルデレロ等においても、地下に高温の花崗岩が見つかっているので(第1図)、これらのうちボーリング調査により3次元的な形態が明らかになってきている、ガイザースとトンゴナンの高温の花崗岩体について紹介したい。

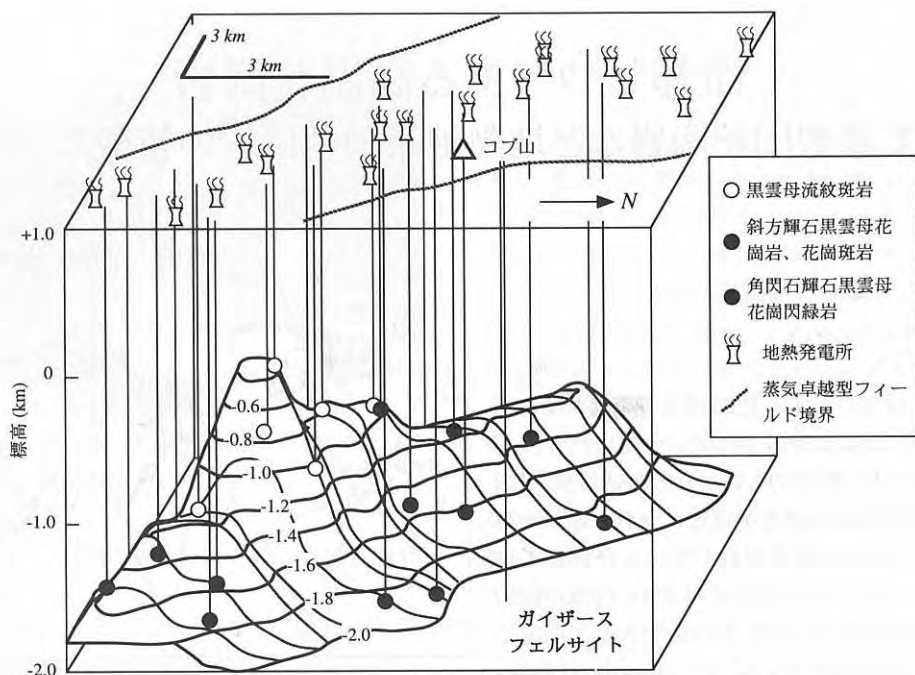
2. ガイザース地熱地帯の花崗岩

カリフォルニア州の北部、サンフランシスコから100kmほど北に上ったところに、ガイザースと呼ばれる世界最大の地熱地帯が広がっている。地表にはフランシスカン層群が分布し、サンアンドレアス断層に平行な横ずれ断層が走り、東側には第四紀のクリアイク火山岩類が分布している(笹田, 1986)。ここでは20基を越える地熱発電所から合わせて200万KWの電力が作り出されている。カリフォルニア州では電力の約10%が、ガイザースをはじめとする地熱発電所から供給されている。

ガイザース地熱地帯の開発は1950年代に始まり、

1) 産総研 深部地質環境研究センター
2) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: 高温花崗岩, 地熱地帯, ボーリング, 葛根田花崗岩



第2図 ガイザース地熱地帯の花崗岩体 (Hullen and Nielson, 1993を参照)。

当初は数百m程度の深さの坑井から得られた蒸気で発電が行われていたが、80年代に入り2,000mを越える深さの坑井が掘削されるようになると、堆積岩を掘り進んだ深部で、細粒の貫入岩がボーリングで捉えられるようになった。そしてボーリングの数が増えるにつれ、それが地下で大きな広がりをもつ貫入岩体の頭の部分であることがわかってきた(第2図)。この貫入岩体を構成する主要な岩石は花崗岩であるが、ガイザースではこの貫入岩に初めに付けられたフェルサイトという名称(細粒で石英および長石に富む火成岩)が、その後ずっとこの岩体の総称に用いられている。フェルサイト岩体は岩相変化に富み、黒雲母流紋斑岩、斜方輝石黒雲母花崗岩、角閃石輝石黒雲母花崗閃緑岩等の半深成岩および深成岩的なテクスチャーの岩石からなる。フェルサイト岩体は現在350℃の高温を保持しており、この岩体を構成する岩石のK-Ar年代は、2.4-0.9Maときわめて若い(Hullen and Nielson, 1993)。通常100km²を越える露出面積をもつ花崗岩体をバソリスと呼ぶが、このフェルサイト岩体は地表にこそ露出していないが、地下で15km×12kmの広がりをもつことが確認されていることから、まぎれもなくバソリスといえるものである(第2図、第1表)。

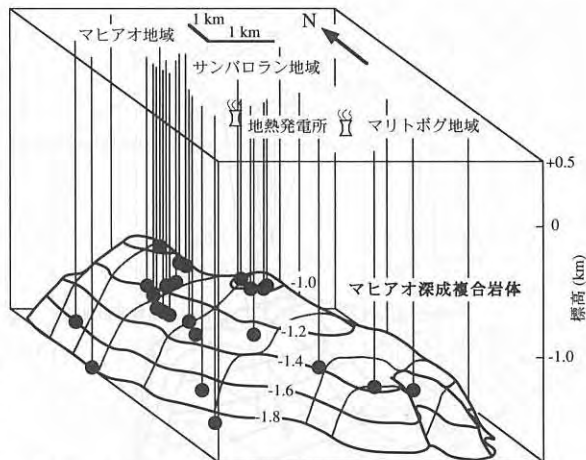
第1表 地熱地帯の花崗岩の特徴一覧。

場 所	ガイザース (アメリカ)	トンゴナン (フィリピン)	葛根田 (日本)
命 名	“フェルサイト”	マヒアオ深成複合岩体	葛根田花崗岩
岩石名	・黒雲母流紋斑岩 ・斜方輝石黒雲母花崗岩、 花崗斑岩 ・角閃石輝石黒雲母花崗閃緑岩	花崗岩-はんれい岩 ・デイサイト岩脈	・花崗岩-石英閃緑岩
K-Ar年代	2.4-0.9Ma	中新世後期以降	0.21-0.01Ma
温 度	<350℃	<330℃	<350℃>500℃
広がり	15km×12km	6km×5km	3km×2km
深 さ	1-4km	1-2km	2-3km

フェルサイトは多かれ少なかれ変質しており、とくに岩体の頂部に向かって変質は顕著となっている。変質鉱物としては、石英、アルバイト、カリ長石、アクチノライト、緑れん石、緑泥石、ぶどう石、ポロン珪酸塩鉱物(電気石、鉄斧石)等がみられ、それらのあるものは鉱物脈を形作り、またキャビティを縁取り、あるいは角礫部のマトリックスなどに産する。また、石英・電気石等からなる鉱物脈がフェルサイト岩体の内部およびホルンフェルス化した地層(フランスカン層群)の広い範囲で分布している(Thompson and Gunderson, 1991; Hullen and Nielson, 1993)。

ガイザース地熱地帯では、飽和蒸気が岩石の隙間を満たしており、240-250℃の蒸気卓越型地熱貯

留層が地下に広く分布している。フェルサイト岩体の頂部も、この蒸気卓越型地熱貯留層の一部を構成している。変質鉱物の分布は現在の温度分布とほぼ整合的であり、熱水性鉱物中の流体包有物は、現在の温度にいたるまでの冷却過程を記録している。流体包有物を見ると、冷却しつつあるフェルサイトの岩体の内部およびその周辺には、かつて400℃前後の温度を保持していた時点で44%という高塩濃度の熱水が存在していたことがわかる。また、温度が265℃になった時点で極めて低い塩濃度の蒸気凝縮水が捕獲されていることから、この時点で現在の蒸気卓越型貯留層の形成が始まったものと考えられている(Moore and Gunderson, 1995)。



第3図 トンゴナン地熱地帯の花崗岩体 (Lovelock et al., 1982 を参照)。

3. トンゴナン地熱地帯の花崗岩

レイテ島にはフィリピン群島を縦断する右横ずれのフィリピン断層が走っており、この断層近傍に同国で有数の地熱地帯であるトンゴナンがある。現在フィリピンは米国につき世界第2位の地熱発電国であり、国内の総電力需要の4分の1を地熱発電で賄っている。トンゴナンでは1970年代後半から地熱エネルギーの開発が積極的に進められ、開発当初から地下1-2kmの深さに花崗岩体が存在することが知られていた。この花崗岩体と母岩である安山岩との境界付近が透水性がよいことから開発のターゲットとなり、すでに20本の坑井が花崗岩体に届いている (Lovelock et al., 1982; Scott, 2001)。地下において少なくとも6km×5kmの広がりをもつこの岩体は、マヒアオ深成複合岩体と呼ばれている (第3図、第1表)。花崗岩体は北西方向に伸びた形状をしており、花崗岩質からはんれい岩質の岩石から構成されている。また母岩との接触部付近には細粒閃緑岩の岩脈や角礫岩が分布する。

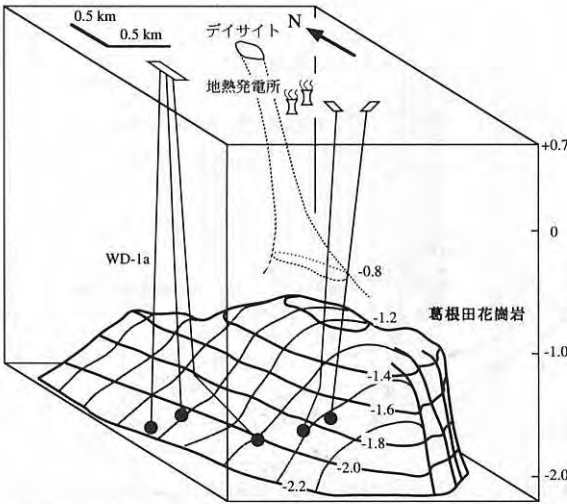
花崗岩体の現在の温度は、坑井で調査されている範囲内で330℃あり、温度分布は熱水対流系によって規制されている。熱水による変質作用は、花崗岩の内部から地表までの広い範囲に及んでいる。変質鉱物の分布は地表から地下に向かい、スメクタイト帯・遷移帯(混合層粘土鉱物)・イライト帯に区分され、緑れん石の出現深度は遷移帯とイライト帯の境界にほぼ相当している。マヒアオ深成複合岩体中にはイライト、緑れん石のほか緑泥石、ア

ルバイト、黄鉄鉱が一般に認められ、これらの鉱物を含む熱水性鉱物脈がよく発達している。また、岩体の一部にはマグマ性流体の関与が考えられるトパーズ、ズニ石、蛍石、電気石等を含むグライゼン化作用も見られる。流体包有物として鉱物中に捕獲されている流体の多くは、塩濃度の極めて低い天水の循環で説明できるものであるが、深成複合岩体の周辺ではNaClを娘鉱物とする40%程度の高塩濃度の流体も捕獲されている (Reyes, 1990; Scott, 2001)。

変質作用が進んでいるため、マヒアオ深成複合岩体の形成年代は求められていない。地質学的関係から、岩体の年代は中新世後期以降と推定されているにすぎない。しかし、地下温度分布をみると、深成複合岩体の形に調和的になっており、ガイザース同様にこの深成複合岩体がトンゴナン地熱地帯の熱源となっているようにみえる。つまりマヒアオ深成複合岩体が冷却しつつある若い貫入岩体である可能性は否定できない。

4. 葛根田地熱地帯の花崗岩

火山国であるわが国は地熱資源にも恵まれており、高温の温泉、噴気が見られる地熱地域が火山フロント沿いに広がっている。中でも岩手山、八幡平、秋田焼山等の火山を擁する岩手・秋田両県にまたがる地域は、わが国で有数の地熱地帯として知られ、仙岩地熱地域と呼ばれている。その一角を



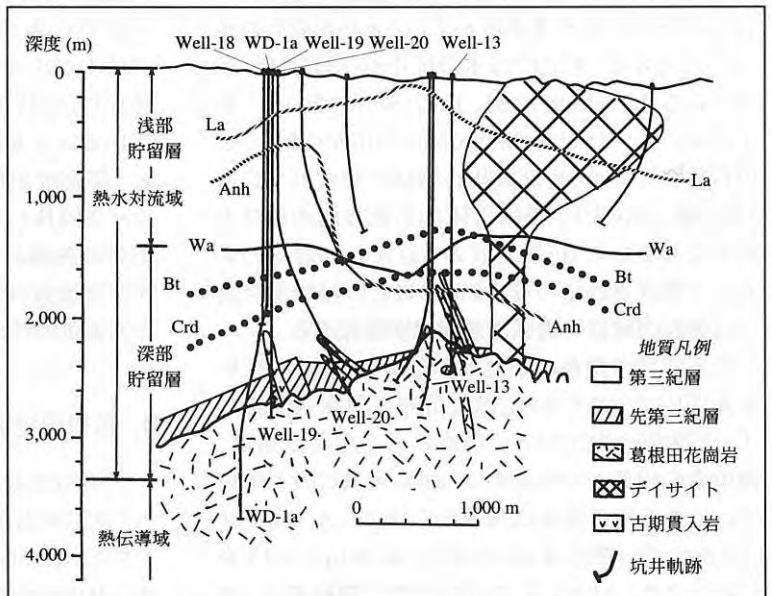
第4図 葛根田地熱地帯の花崗岩体(加藤・佐藤, 1995を参照).

占める葛根田地熱地帯では、2つの地熱発電所から8万KWの電力が供給されている。葛根田では80年代の後半に発電所に蒸気を供給する日本重化学工業(株)によるボーリング調査で、地下2kmのところに350℃以上の高温花崗岩が見つかった(村松ほか, 1994)。そしてトンゴナン同様に花崗岩と母岩との境界部付近の透水性がよかったことから、その後もボーリングによる調査が行われ、次第にこの花崗岩体の形状が明らかになっていった(加藤・佐藤, 1995)。葛根田花崗岩は地下約2kmのところに頂部をもち、少なくとも3km×2kmの広がりをもつことが、これまでの調査により確認されている(第4図, 第1表)。葛根田花崗岩は一部の岩石に斑状組織がみられるが、多くは等粒状の岩石からなる。主な岩相は黒雲母-斜方輝石石英閃緑岩, 黒雲母-角閃石トータル岩, 黒雲母-角閃石花崗閃緑岩であるが、一部に優白質であったり細粒の暗色包有物を含む不均質な岩相が存在する。全岩のSiO₂含有量は65-75%の範囲にあり, Fe-Mg-(Na+K)比からみると典型的なカルクアルカリ岩に分類される(蟹沢ほか, 1994)。また、長石の一部と石英の一部が連晶し微文象組織をつくるほか, しばしばキ

ャピティ(数mm大の空隙)が見られること(Ohtani et al., 2000), また流体包有物が多く含まれることなど, 浅所貫入型花崗岩に特有の性質を有している。

葛根田花崗岩は先第三系および第三紀の火山岩類・堆積岩類中に貫入し, 1km前後の厚さの接触変成帯を形成している。主な変成鉱物は黒雲母・堇青石・直閃石・紅柱石であり, これらの鉱物の出現から下位に存在する花崗岩体までの距離が予測できることから, 葛根田では変成岩岩石学が地熱探査に大いに貢献した(加藤・佐藤, 1995)。接触変成帯の上位には熱水変質帯が, セリサイト帯, セリサイト/モンモリロナイト混合層粘土鉱物帯, モンモリロナイト帯の順に地表に向かい分布する。現在の地温構造との関係でみると, 熱水変質帯は地温構造と調和的であるが, 接触変成帯の構造は現在の温度構造とは一致していない。例えばワイラカイトの出現深度の下限は大きく接触変成帯中に入り込んでいる。花崗岩の貫入により形成された接触変成帯と熱水変質帯の関係が整合的でないことは, 貫入後に主として熱伝導により形成された温度構造がその後の地表水の大規模な循環による対流系の発達により乱されたことを物語っている(第5図)。

このほか葛根田においてはマグマ性の熱水性鉱



第5図 葛根田地熱地帯の変質鉱物及び変成鉱物の出現深度(Doi et al., 1998を簡略化)。

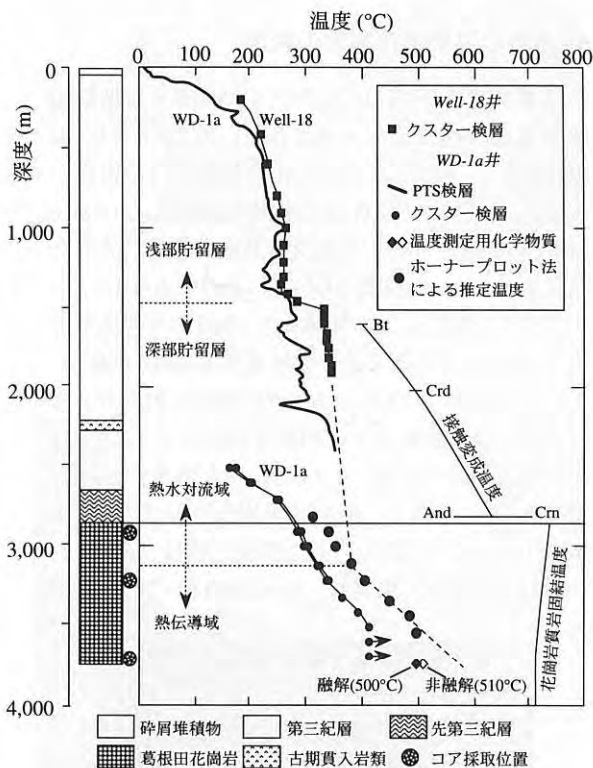
物としては電気石がセリサイト帯から紅柱石帯にかけて広範囲に見られるほか、斧石・蛍石・輝水鉛鉱・電気石といった鉱物が、花崗岩の頂部近くに産することが多い(加藤・佐藤, 1995)。

葛根田花崗岩の貫入の時期については、K-Ar年代測定の結果から検討されている。花崗岩が現在もかなりの高温であるため、鉱物によってはK-Ar系に関して解放系にあるか一部が保持された状態にあることが予想される。地温が300-350℃のところから採取された試料では黒雲母で 0.14 ± 0.04 Maと 0.21 ± 0.04 Ma、カリ長石で 0.14 ± 0.02 Maの年代が、また500℃を越えるところから採取された試料では黒雲母、カリ長石ともにほとんど0に近い年代が得られている(蟹沢ほか, 1994; Doi *et al.*, 1998)。

5. 葛根田地熱地帯の温度構造

葛根田花崗岩の特徴が次第に明らかになる中で、1992年から新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)・地質調査所により深部地熱資源調査が実施され、このプロジェクトで掘削された深部坑井WD-1aは95年7月に3,729mの深さに到達した。同坑井では2,860m以深が花崗岩であり、3,500mを越えてからはCO₂、H₂Sのガスの流入に加え、花崗岩から40%もの高濃度の塩水の流入があり、3,729mで掘止めにいたった(Saito *et al.*, 1998; Kasai *et al.*, 1998)。坑底温度の測定にあたっては、極めて高温であったために通常の温度検層機器では測定ができず、融点が既知の金属および化学物質が用いられた。純粋な金属をキャピラリーに真空で封じ込め、ゾンデに格納して坑底まで降り引き上げると、亜鉛(融点419℃)及びテルル(融点449.5℃)は、ともに完全に溶融していた(Sasada *et al.*, 1996)。またTempil-pelletという商品名をもつ化学物質は、ほぼ10℃きざみで温度の測定が可能で、これを用いたところ坑底は500℃以上で510℃以下の温度であるという測定結果が得られた(Ikeuchi *et al.*, 1998)。ついに深部坑井WD-1aは、まだ誰も見たことのない500℃の花崗岩の中にまできてしまった。

葛根田花崗岩が2,860m以深に分布する深部坑井WD-1aの温度プロファイルを見ると、3,100mを



第6図 深部坑井WD-1aの温度プロファイル (Ikeuchi *et al.*, 1998に加筆)。
Bt: 黒雲母, Crd: 董青石, And: 紅柱石, Crm: コランダム。PTS検層温度、クスター検層温度、ホーナープロット法で推定された最終平衡地層温度はIkeuchi *et al.* (1998)による。花崗岩質岩の固結温度はTuttle and Bowen (1958)を参考にした。地質柱状図はUchida *et al.* (1996)による。

第6図 深部坑井WD-1aの温度プロファイル (Ikeuchi *et al.*, 1998に加筆)。

境にして大きく温度構造が異なっていることがわかる(第6図)。すなわち、3,100mより浅所では温度プロファイルは水の沸騰曲線と近似され、この領域に発達している熱水対流系により支配されている。一方3,100m以深では温度プロファイルは大局的に見ると直線的であり、これは花崗岩体内部において熱伝導が支配的であることを示している。3,100mを境にして異なる温度構造を構造地質学的視点から見ると、3,100mより浅所では岩石中に様々な亀裂が生じていて、そこを熱水が循環している。熱水からは鉱物が晶出するので、この領域では亀裂は石英や硬石膏等の熱水性鉱物により充填されている。一方、3,100mより下部では、岩石は大きく割れることがないため、熱水性鉱物脈はめったに存在しない。3,100mでの温度は370℃であり、ほぼこの温度が葛根田における現在の脆性・延性境界となっている(Muraoka *et al.*, 1998)。

6. 500℃葛根田花崗岩の特徴

深部坑井WD-1aは、坑井内を循環させる掘削流体の温度管理に工夫が施されていたこともあり、掘削作業は順調に進み、3,729mの坑底から花崗岩からなる3mのコア(写真1)の採取に成功した(Saito *et al.*, 1998)。500℃を越える温度の坑底にあった花崗岩は、どんな特徴をもっているのでしょうか。

まず、記載岩石学の知識から、500℃を越える環境では通常見られるような熱水変質鉱物がない、たいへん新鮮な岩石であろうと予想されたが、採取されたコア試料はその期待を裏切ることなく、緑泥石や緑れん石、セリサイトといった熱水性鉱物のまったく見られない、極めて新鮮な等粒状のトータル岩であった(写真2)。主な構成鉱物は、石英・カリ長石・斜長石・黒雲母・普通角閃石・アクチノ閃

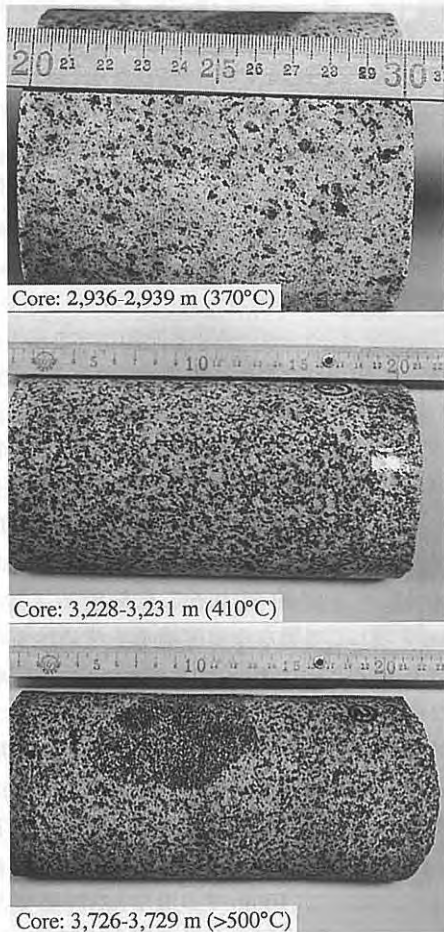
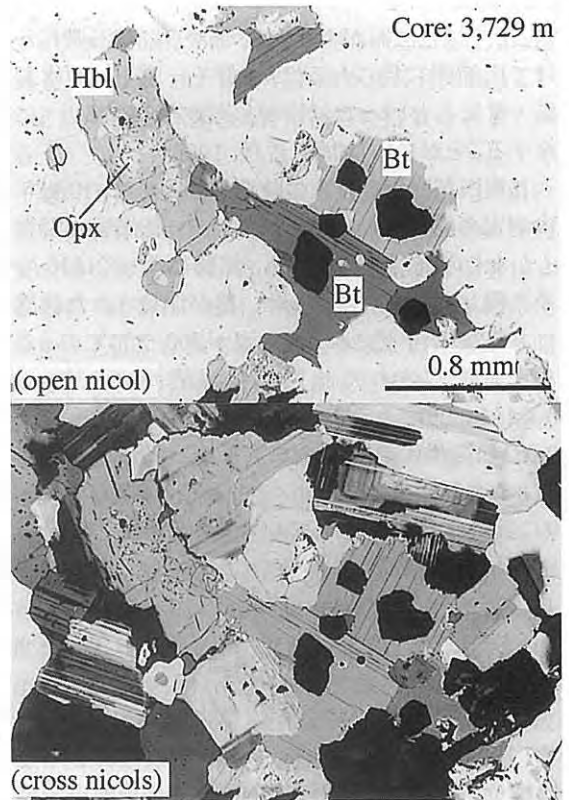


写真1 葛根田花崗岩のコア試料(深部坑井WD-1a)。

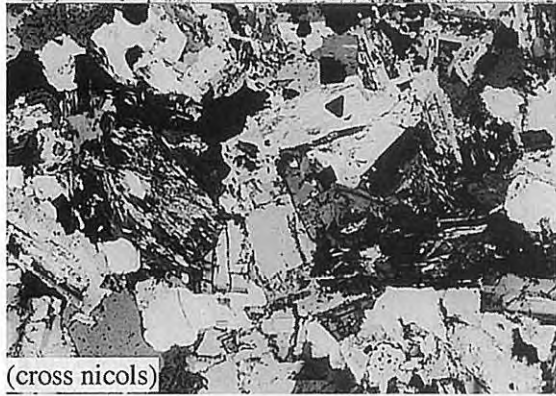
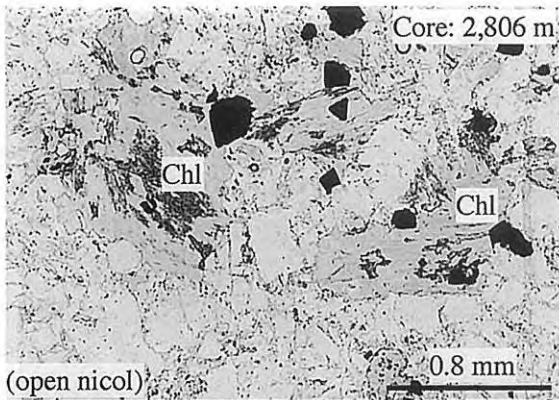


Bt : 黒雲母, Hbl : 普通角閃石, Opx : 斜方輝石。

写真2 未変質のトータル岩(深部坑井WD-1a)。

石・単斜輝石・斜方輝石・磁鉄鉱であり、それに少量のジルコン・燐灰石・黄鉄鉱を伴う。単斜輝石及び斜方輝石は斜長石のコア及び普通角閃石中に包有されている。斜方輝石の一部はカミングトン閃石に変質している。また普通角閃石の一部にはアクチノ閃石が見られる。磁鉄鉱は普通角閃石及び黒雲母中に包有されることが多く、イルメナイトのラメラを有する。斜長石は、顕著な累帯構造(An87-24%)をしており、多くの花崗岩中で斜長石がカリ長石に接する部分に見られるアルバイトに富むリムが認められない。

Buddington (1959) が花崗岩を貫入の深さに応じてカタゾーン、メソゾーン、エピゾーンと区分し、浅所であるエピゾーンの花崗岩は周囲に不調和的に貫入するとともに、しばしば同じ時代の火山岩類を伴うと述べているが、エピゾーンの花崗岩のもう1つの特徴は、ほとんどの岩石が多かれ少なかれ熱水変質を被っていることである。わが国の例では山陰地方の古第三紀花崗岩や東北地方のグリーン

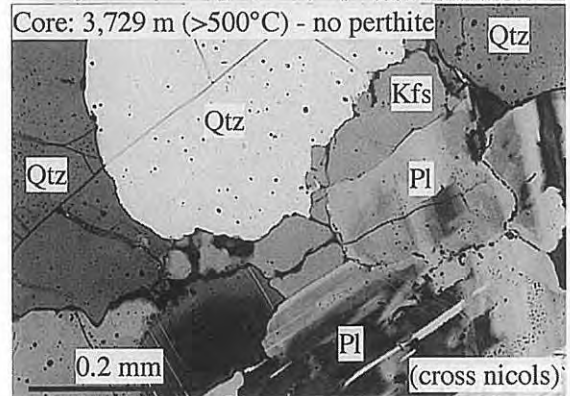
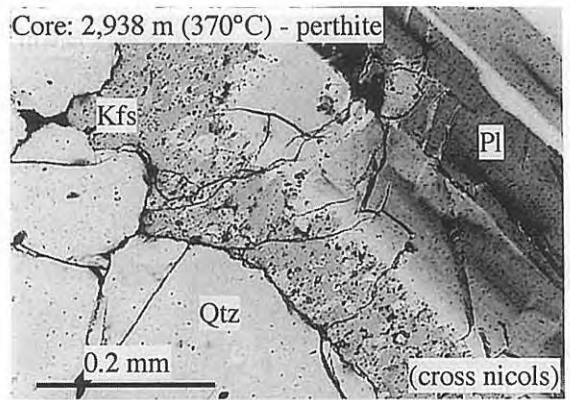


Chl : 緑泥石.

写真3 熱水変質したトータル岩(深部坑井Well-19).

タフ地域に分布する小岩体などこのようなタイプの花崗岩が多い。それらに比較して葛根田花崗岩は、浅所に貫入したことが明らかなエピゾーンの花崗岩であるにもかかわらず、深部坑井で採取した500℃の試料にはまったく熱水変質の影響が認められない。いずれ温度が下がった時点でこの花崗岩も、変質鉱物を含むごく普通のエピゾーンの花崗岩に変貌するのであろう。現に葛根田においても350℃まで冷却し、熱水対流系が発達している深さにある花崗岩体の最上部では、普通角閃石や黒雲母が緑泥石等の熱水性鉱物に変質している(写真3)。豊橋でのハットン シンポジウムでの発表の時に、この新鮮な花崗岩の行く末についての質問を受けたが、鉱物を愛おしむ質問者は500℃の花崗岩に含まれる未変質の角閃石を“Happy Hornblende”と呼んでいた。

500℃の花崗岩として予想していたもう1つのことは、カリ長石が2相分離する前の段階ではないかということであった。これも観察結果はその通りで、カリ長石にはアルバイト成分に富む離溶ラメラが発

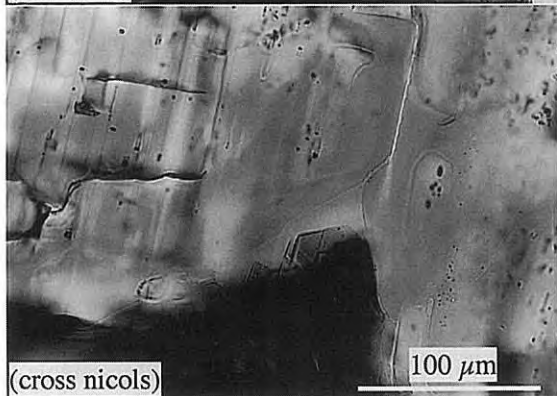
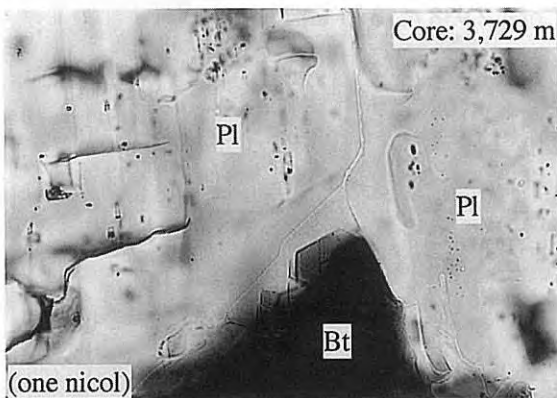


Kfs : カリ長石, Pl : 斜長石, Qtz : 石英.

写真4 葛根田花崗岩のカリ長石(深部坑井WD-1a).

達していなかった(写真4)。どんな花崗岩にもごく普通に見られるアルバイトラメラをもつカリ長石(パーサイト)が、500℃の花崗岩にはなかった。パーサイトの形成には温度のほかにも共存する流体の組成が関係している。NaAlSi₃O₈-KAlSi₃O₈-NaCl-KCl-H₂O系の熱水実験データ(Lagache and Weisbrod, 1977)を参照すると、この花崗岩と共存していたであろう深部坑井WD-1aの坑底付近から採取されたK/Na=0.37の組成をもつ塩水の存在下では、パーサイトは形成されない。観察結果は熱水実験で予測されていた通りであった。

これら事前に予想していたことのほかに、実際に薄片を観察してわかったことが2つある。その1つは、構成鉱物の間に隙間が存在していたことである(Fujimoto *et al.*, 2000, Sasaki *et al.*, 2003)。隙間が薄片作成時にできたものでなく、もともと岩石中にあった証拠として、隙間に自形の鉱物が認められることがあげられる。たとえば写真5に見られるようなフレーク状の黒雲母の存在である。このほか、



Bt: 黒雲母, Pl: 斜長石, 厚めの薄片で観察.

写真5 空隙に向かって成長した自形の黒雲母(深部坑井WD-1a).

石英や長石が空隙に向かって自形を呈していることがしばしばあり, これらの観察結果から500℃の花崗岩の粒間はすべて塞がっておらず, 一部に隙間が存在しているものと判断される. このような隙間には, 坑底付近で採取に成功した40%もの溶存物質を含む塩水および理論的にそれと平衡にあるはずの気相—これらはともに石英中の流体包有物に見られる(小松ほか, 1998)—が存在していたのであろう.

薄片を見てわかったもう1つのことは, シリケートメルト包有物の存在である(写真6). 通常の花崗岩にはメルト包有物は存在しない. かつてTuttle (1952) が花崗岩と火山岩の違いの1つにメルト包有物の存在の有無をあげていた. 彼によると花崗岩の組織は基本的に再結晶によるものであるから, その過程でメルト包有物は鉱物中からはき出されてしまうという. しかし, 花崗岩中にメルト包有物が全く見つからないかという点, そうではなく, アセンション島の花崗岩捕獲岩 (Roedder and

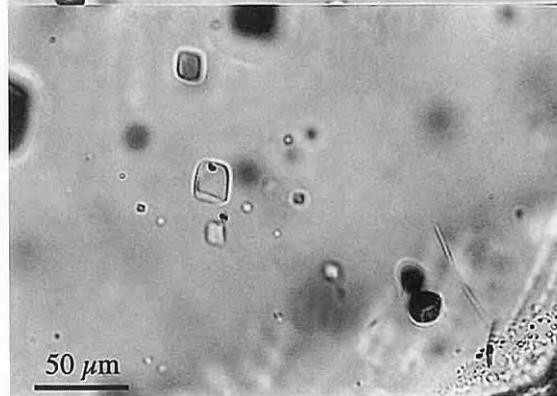
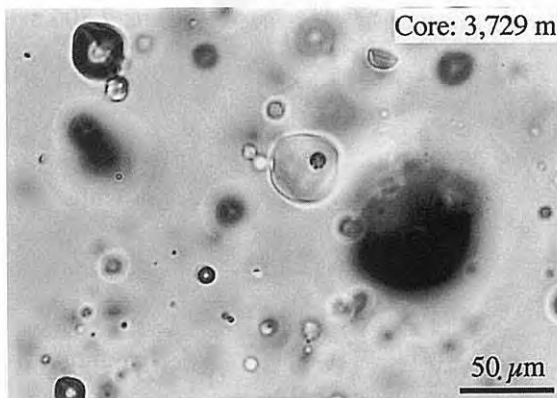
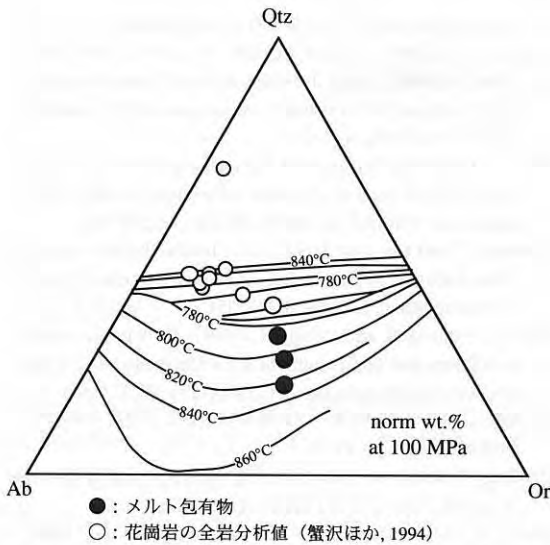


写真6 石英中のメルト包有物(深部坑井WD-1a).

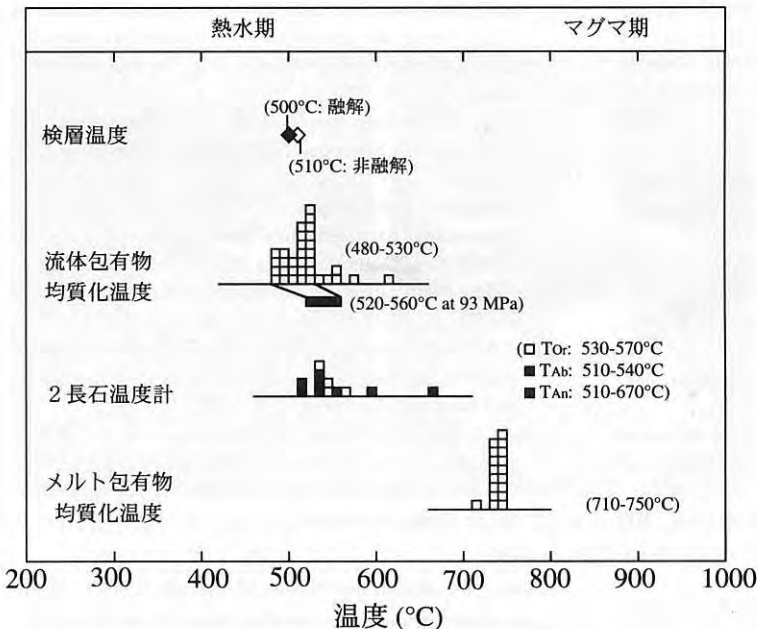
Coombs, 1967) とか, サルジニアの花崗岩 (Frezza-zotti, 1992) 等での報告がある. また, わが国では水分が多く核形成が起こりにくかったと推定される花崗岩ペグマタイト (Enjoji, 1978; 笹田ほか, 1994) の中から見つかっている. しかし, いずれにしても花崗岩中のメルト包有物の存在は極めて希である. ごく普通のエピゾーンの花崗岩といえる葛根田花崗岩の場合は, いずれ脱ガラス化が進み, あるいはまた再結晶作用等で姿を消す運命にあるものかもしれない. だとすれば, これらは “Happy Melt Inclusion” である. これらのメルト包有物を EPMA で分析すると, 融点が一番低い花崗岩質マグマの組成に近いものであった (第7図).

最後に, 500℃葛根田花崗岩について, 坑内計測により求めた検層温度と地質学的手法により求めた温度とを比較した結果について述べたい (第8図). 坑内計測では, 化学物質の融点から求めた温度が500℃と510℃の間を示している. ただし, この計測は坑井を冷却しつつ掘削を行った直後のものである, 実際の地温はこの温度より多少



第7図 メルト包有物のノルム組成 (Tuttle and Bowen, 1958に投影).

高めである可能性がある。一方、地質学的手法としては、流体包有物温度計および長石温度計 (Furhman and Lindsley, 1988)、メルト包有物温度計が用いられた、流体包有物の均質化温度の分布は480℃から530℃の範囲に入るものが多い。これを岩圧(93MPa)で圧力補正すると520℃から560℃の範囲となる。長石温度計では510℃から



第8図 検層温度と地質温度計で求めた温度の比較 (Sasaki et al., 2003を簡略化).

540℃の範囲に入るものが多い。検層温度とこれらの地質温度計による温度は、比較的よい一致をみている。葛根田花崗岩では冷却が進行しているが、500℃前後の温度においては、鉱物間で平衡に近い状態を実現しているといえるかもしれない。一方、メルト包有物では、710℃から750℃とかなり高めの温度を示している。メルト包有物では捕獲後に内壁の石英が成長している可能性はあるものの、マグマが捕獲された温度を保持している可能性が高い。

7. まとめ

米国のガイザース、フィリピンのトンゴナン、わが国の葛根田の各地熱地帯の地下で高温の花崗岩体が見つかった。それらは熱水対流系が発達している温度である300℃からマグマのサブソリダス温度に相当する500℃の温度を保持している。花崗岩の熱水変質の様子は、およそ370℃の延性-脆性境界を境にして大きく異なる。

500℃の葛根田花崗岩では、岩石中に次のような特徴が見られた。1) 岩石は熱水変質を受けていない。2) 鉱物の粒間は完全にふさがっていない。3) カリ長石に離溶ラメラが存在しない。4) 石英中にメルト包有物が存在する。また、この花崗岩中の隙間には、CO₂、H₂Sを含む高塩濃度の塩水が存在している。

8. おわりに

葛根田花崗岩の研究で、初めて500℃の花崗岩を顕微鏡で覗いて見た時の感動はいまでも忘れられないが、これまでの科学的研究で築かれた岩石学の理論が、500℃の花崗岩の特徴を再現できることがわかった時にも静かな感動があった。小文で述べた葛根田花崗岩の記載岩石学的特徴については Sasaki et al. (2003) に詳しく述べてあるので、関心をもたれた方は原著を参照していただきたい。

文 献

- Buddington, A.F. (1959) : Granite emplacement with special reference to north America. *Bull. Geol. Soc. Am.* 70, 671-747.
- Doi, N., Kato, O., Ikeuchi, K., Komatsu, R., Miyazaki, S., Akaku, K. and Uchida, T. (1998) : Genesis of the plutonic-hydrothermal system around Quaternary granite in the Kakkonda geothermal system, Japan. *Geothermics*, 27, 663-690.
- Enjoji, M. (1978) : Melt inclusion in garnet from Yamanowo pegmatite, Tsukuba, Japan. *Ann. Rep. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba*, 4, 15-18.
- Frezzotti, M.L. (1992) : Magmatic immiscibility and fluid phase evolution in the Mount Genis granite (southeastern Sardinia, Italy). *Geochim. Cosmochim. Acta* 56, 21-33.
- Furhman, M.L. and Lindsley, D.H. (1988) : Ternary feldspar modeling and thermometry. *Am. Mineral.* 73, 201-215.
- Fujimoto, K., Takahashi, M., Doi, N. and Kato, O. (2000) : High permeabilities of Quaternary granites in the Kakkonda geothermal area, northeast Japan. *Proc. World Geothermal Congress 2000*, 1139-1144.
- Hullen, J.B. and Nielson, D.L. (1993) : Interim report on geology of Geyser felsite, northwestern California. *Geotherm. Resour. Counc. Trans.*, 17, 249-258.
- Ikeuchi, K., Doi, N., Sakagawa, Y., Kamenosono, H. and Uchida, T. (1998) : High-temperature measurements in well WD-1a and the thermal structure of the Kakkonda geothermal system, Japan. *Geothermics*, 27, 591-607.
- 蟹沢聡史・土井宣夫・加藤 修・石川賢一(1994) : 岩手県, 葛根田地熱地域に伏在する第四紀葛根田花崗岩. *岩鉱*, 89, 390-407.
- Kasai, K., Sakagawa, Y., Komatsu, R., Sasaki, M., Akaku, K. and Uchida, T. (1998) : The origin of hypersaline liquid in the Quaternary Kakkonda Granite, sampled from well WD-1a, Kakkonda geothermal system, Japan. *Geothermics*, 27, 631-645.
- 加藤 修・佐藤 浩(1995) : 第四紀花崗岩をターゲットにした葛根田地熱地域の深部貯留層開発について. *資源地質*, 45, 131-144.
- 小松 亮・池内 研・土井宣夫・佐々木宗建・内田利弘・笹田政克(1998) : 深部調査井(掘削深度3,729m)の流体包有物からみた葛根田花崗岩の特徴と葛根田地熱系. *日本地熱学会誌*, 20, 209-224.
- Lagache, M. and Weisbrod, A. (1977) : The system: two alkali feldspar-KCl-NaCl-H₂O at moderate to high temperatures and low pressures. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 62, 77-101.
- Lovelock, B.G., Cope, D.M. and Baltasar, A.S.J. (1982) : A hydrogeochemical model of the Tongonan geothermal field. *Proc. Pacific Geothermal Conference and 4th New Zealand Geothermal Workshop*, 259-264.
- Lyell, C. (1830) : *Principles of Geology*. Reprinted by Penguin Books in 1997. 472p.
- Moore, J.N. and Gunderson, R.P. (1995) : Fluid inclusion and isotopic systematics of an evolving magmatic-system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 3887-3907.
- 村松容一・土井宣夫・加藤 修・阪口圭一・杉原光彦(1994) : 葛根田地熱地域の深部地熱資源と新規花崗岩類. *地質ニュース*, no.477, 1-4.
- Muraoka, H., Uchida, T., Sasada, M., Yagi, M., Akaku, K., Sasaki, M., Yasukawa, K., Miyazaki, S., Doi, N., Saito, S., Sato, K. and Tanaka, S. (1998) : Deep Geothermal Resources Survey Program: A link of igneous, metamorphic and hydrothermal processes in the well encountered 500°C at 3,729 m. *Geothermics*, 27, 507-534.
- Ohtani, T., Nakashima, Y. and Muraoka, H. (2000) : Three-dimensional miarolitic cavity distribution in the Kakkonda granite from borehole WD-1a using X-ray computerized tomography. *Engineering Geol.* 56, 1-9.
- Reyes, A.G. (1990) : Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment. *Jour. Volcanol. Geotherm. Resear.*, 43, 279-309.
- Roedder, E. and Coombs, D.S. (1967) : Immiscibility in granitic melts, indicated by fluid inclusions in ejected granitic blocks in Ascension Island. *J. Petrol.* 8, 417-451.
- Saito, S., Sakuma, S. and Uchida, T. (1998) : Drilling procedures, techniques and test results for a 3.7 km deep, 500°C exploration well, Kakkonda, Japan. *Geothermics*, 27, 573-590.
- 笹田政克(1986) : ザ・ガイザーズの地質構造および地熱リザーバー. *地熱エネルギー*, 11, 43-54.
- 笹田政克・佐脇貴幸・佐々木宗建(1994) : わが国の花崗岩類中の流体包有物について(予察)(演旨). *岩鉱*, 89, 155-156.
- Sasada, M., Doi, N., Muffler, L.J.P. and Hedenquist, J.W. ed. (1998) : Deep Geothermal Systems, Japanese National Project at Kakkonda. Special Issue of *Geothermics*, 27, 5/6, 507-721.
- Sasada, M. and Sasaki, M. (2003) : Granitoids at cooling stages from sub-solidus to hydrothermal temperatures: evidence from active geothermal systems. *Hutton Symposium V "The Origin of Granites and Related Rocks"* Abstract with Program, *Geol. Surv. Japan Interim-Rep.* 29, 130.
- Sasada, M., Sawaki, T., Muraoka, H., Ikeuchi, K., Doi, N., Yagi, M. and Sasaki, M. (1996) : The highest borehole temperature (449°C) determined by melting of pure metal tellurium; WD-1a, Kakkonda geothermal system, Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, 47, 361-364.
- Sasaki, M., Fujimoto, K., Sawaki, T., Tsukamoto, H., Kato, O., Komatsu, R., Doi, N. and Sasada, M. (2003) : Petrographic features of a high-temperature granite just newly solidified magma at the Kakkonda geothermal field, Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Resear.* 121, 247-269.
- Scott, G.L. (2001) : Hydrothermal alteration and fluid geochemistry of the Tongonan geothermal field, Philippines. *Resour. Geol.*, 51, 117-134.
- Thompson, R.C. and Gunderson, R.P. (1991) : The orientation of steam-bearing fractures at the Geysers geothermal field. *Geotherm. Resour. Counc. Spec. Rep.*, No. 17, 65-68.
- Tuttle, O.F. (1952) : Origin of the contrasting mineralogy of extrusive and plutonic salic rocks. *Jour. Geol.*, 60, 107-124.
- Tuttle, O. F. and Bowen, N. L. (1958) : Origin of granite in the light of experimental studies in the system NaAlSi₃O₈-KAlSi₃O₈-SiO₂-H₂O. *Geol. Soc. Am. Memoir*, 74, 1-153.
- Uchida, T., Akaku, K., Sasaki, M., Kamenosono, H., Doi, N. and Miyazaki, S. (1996) : Recent progress of NEDO's "Deep-Seated Geothermal Resources Survey" Project. *Geotherm. Resour. Counc. Trans.*, 20, 643-648.

SASADA Masakatsu and SASAKI Munetake (2004) : High-temperature granitoids at cooling stages from active geothermal systems including the Kakkonda granite.

< 受付 : 2003年12月1日 >